



1c971 U.S. PTO  
10/045260



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 100 58 650.3  
**Anmeldetag:** 25. November 2000  
**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss, Heidenheim an der Brenz/DE  
**Bezeichnung:** Verfahren zur interferometrischen Messung von  
nichtrotationssymmetrischen Wellenfrontfehlern  
**IPC:** G 01 B 11/24

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 04. Oktober 2001  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Hiebinger

Verfahren zur interferometrischen Messung von nicht-rotationssymmetrischen Wellenfrontfehlern

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur interferometrischen Messung, insbesondere zur interferometrischen Absolutmessung, von nicht-rotationssymmetrischen Wellenfrontfehlern an einem Prüfling, nach der im Oberbegriff von Anspruch 1 näher definierten Art.

Aus dem allgemeinen Stand der Technik und der allgemeinen Praxis sind derartige Verfahren zur interferometrischen Absolutmessung von nicht-rotationssymmetrischen Wellenfrontfehlern von optischen Flächen in Reflektion und optischen Elementen in Transmission bekannt. Ein etabliertes Verfahren ist der sogenannte Drehstellungstest mit  $n$  äquidistanten Rotationen um  $360^\circ/n$  zur Absolutmessung der nicht-rotationssymmetrischen Fehler eines Prüflings. Ein derartiges Verfahren ist beispielsweise durch "R. Freimann, B. Dörband, F. Höller: "Absolute Measurement Of Non-Comatic Aspheric Surface Errors", Optics Communication, 161, 106-114, 1999" beschrieben.

Evans und Kestner zeigen in "C.J. Evans, R.N. Kestner; "Test Optics Error Removal", Applied Optics, Vol.35, 7, 1996" allgemein, daß man mit  $n$  Drehstellungen, wenn man diese über die Messungen entsprechend aufmittelt, alle nicht-rotationssymmetrischen Fehler mit Ausnahme der Ordnungen  $k \cdot n$  absolut bestimmen kann, wobei  $k=1,2,3...$  ist. Dieser verbleibende Restfehler der Ordnung  $k \cdot n$  wird in der Regel um so kleiner je mehr Rotationsstellungen gemessen werden. Es besteht ein großes Interesse daran, schnelle und leistungsfähige Verfahren zu entwickeln, welche eine effizientere Verbesserung Analyse des Wellenfrontfehlers erlauben.

In der JP 8-233552 ist dementsprechend ein Verfahren beschrieben, bei dem mittels mathematischer Methoden zusätzlich zu den gemessenen Punkten weitere Punkte ermittelt werden, um die Ge-

nauigkeit nach Möglichkeit zu verbessern.

Ein darauf aufbauendes weitergehendes Verfahren wird durch die US 5,982,490 beschrieben. Gemäß dem dort beschriebenen "Third modified Example" werden an einem Prüfling vier Meßwerte aufgenommen, welche in vorbestimmten nicht äquidistanten Abständen zueinander angeordnet sind. Über mathematische Operationen werden aus diesen vier Meßwerten weitere Werte ermittelt, so daß letztendlich eine Genauigkeit der Auswertung erreicht werden kann, welche ansonsten die Messung von acht Einzelwerten in äquidistantem Abstand erforderlich gemacht hätte.

Der Nachteil des Verfahrens ist jedoch darin zu sehen, daß hier nur vier konkrete Meßwerte vorliegen, welche lediglich den halben Umfang des Prüflings erfassen, die weiteren Werte sind prinzipbedingt "virtuelle" Meßergebnisse.

Die Aufgabe der Erfindung liegt nun darin, ein Verfahren zur interferometrischen Messung der nicht-rotationssymmetrischen Wellenfrontfehler von optischen Flächen in Reflektion und/oder optischen Elementen in Transmission zu schaffen, welches bei einer vergleichbaren Anzahl von Meßpunkten eine höhere Genauigkeit als der allgemein bekannte Drehstellungstest, oder welches mit einer deutlich geringeren Anzahl an Meßpunkten eine vergleichbare Genauigkeit wie der Drehstellungstest liefert.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch das mit den Merkmalen im kennzeichnenden Teil von Anspruch 1 beschriebene Verfahren gelöst.

Durch die Verwendung von wenigstens zwei unabhängigen Meßreihen, welche jeweils eine Anzahl von äquidistanten Meßpunkten aufweisen, kann hier eine deutliche Verbesserung der Meßgenauigkeit und/oder eine Reduktion der Anzahl der erforderlichen Einzelmeßpunkte erzielt werden.

Dazu weist jede der wenigstens zwei Meßreihen eine bestimmte Anzahl an Meßergebnissen auf, im Falle von zwei Meßreihen bei-

spielsweise  $m$  und  $n$ . Über diese  $m + n$  gemessenen Rotationsstellungen und eine entsprechende mathematische Auswertung kann nun erreicht werden, daß alle nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings mit Ausnahme der Ordnungen  $k \cdot m \cdot n$  absolut bestimmt werden können. Um mit einer kleinstmöglichen Anzahl an Messungen die größtmögliche zu erzielende Genauigkeit zu erreichen, muß die Anzahl der einzelnen Meßergebnisse  $m$  und  $n$  teilerfremd zueinander sein.

Als sinnvolle Anwendung des erfinderischen Verfahrens sind sicherlich überwiegend Meßverfahren mit zwei Meßreihen  $M$ ,  $N$  oder drei Meßreihen  $M$ ,  $N$ ,  $O$  anzusehen, grundlegend sind jedoch auch vier, fünf, sechs oder mehr Meßreihen denkbar. Bei zwei Meßreihen  $M$ ,  $N$ , welche z.B. aus einer Kombination von  $m = 5$  Messungen in der ersten Meßreihe  $M$  und  $n = 7$  Messungen in der zweiten Meßreihe  $N$  bestehen, wird beispielsweise eine höhere Genauigkeit erzielt als bei einem 12-Stellungstest. Bei den vorgeschlagenen  $5 + 7$  Messungen ist außerdem eines der Meßergebnisse doppelt, so daß hier insgesamt lediglich 11 Messungen durchgeführt werden müssen. Bei einem entsprechenden 12-Stellungstest gemäß dem Stand der Technik ließen sich hier alle nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings bis auf die Ordnung  $k \cdot 12$  bestimmen. Bei dem angesprochenen Beispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens als  $5+7$ -Stellungstest lassen sich bei insgesamt 11 Messungen, also einer Messung weniger, bereits alle Fehler mit Ausnahme der Ordnungen  $k \cdot 5 \cdot 7 = k \cdot 35$  bestimmen.

Erweitert man diesen Drehstellungstest auf drei Meßreihen, beispielsweise mit einem  $3+5+7$ -Stellungstest, so lassen sich alle Fehler bis auf die Ordnung  $k \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 = k \cdot 105$  bestimmen. Bei diesem Test sind dann nur 13 Messungen anstatt der theoretischen 15 Messungen erforderlich, da eine der Messungen dreifach auftritt. Somit läßt sich bei in etwa gleichbleibender Anzahl an zu erfassenden Einzelmeßergebnissen die Genauigkeit der Messung bei dem erfindungsgemäßen Verfahren deutlich steigern, wobei weiterhin der gesamte Umfang des Prüflings erfasst wird.

Alternativ dazu wäre es natürlich auch möglich, über eine entsprechende Verringerung der Einzelmeßergebnisse, beispielsweise einen 3+4-Stellungstest, welcher, da eine Messung doppelt vorkommt, lediglich 6 Messungen erfordert, den zeitlichen Meßaufwand zu reduzieren. Damit ließe sich ebenfalls eine Genauigkeit bis auf Fehler der Ordnung  $k \cdot 12$  erzielen, wie beim bisher bekannten 12-Stellungstest. Der entscheidende Vorteil liegt hierbei jedoch darin, daß zum Erreichen einer vergleichbaren Genauigkeit die Anzahl der Einzelmessungen und damit die erforderliche Meßzeit um 50 Prozent reduziert wird.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und aus den nachfolgend anhand der Zeichnung prinzipmäßig dargestellten Ausführungsbeispielen.

Es zeigt:

Figur 1 eine stark schematisierte Darstellung eines prinzipiell möglichen Meßaufbaus; und

Figur 2 die Lage von Meßpunkten an einem Prüfling am Beispiel eines 3+5-Stellungstests.

Figur 1 zeigt in einer stark schematisierten Prinzipdarstellung einen Aufbau zur Durchführung des Verfahrens zur interferometrischen Messung von nicht-rotationssymmetrischen Wellenfrontfehlern an einem Prüfling 1. Dazu dient eine hier prinzipmäßig angedeutete interferometrische Meßeinrichtung 2. Die interferometrische Meßeinrichtung 2 ist schematisch als Michelson-Interferometer 2 dargestellt, es kann sich prinzipiell jedoch um jede andere denkbare Art einer interferometrischen Meßeinrichtung mit den bekannten Möglichkeiten zum Aufteilen der Lichtwege, über halbdurchlässige Spiegel, Lichtleiter, Koppler oder dergleichen mit offenen oder nicht-offenen (z.B. faseroptisches Interferometer) Lichtwegen handeln.

Die interferometrische Meßeinrichtung 2 weist neben einer Lichtquelle 3 ein Referenzelement 4 und eine Einrichtung 5 zur Erfassung der entstehenden Interferenzmuster auf. Die Einrichtung 5 ist mit einer Auswerteeinheit 6 gekoppelt, welche beispielsweise als elektronische Datenverarbeitungseinheit ausgebildet ist, und in welcher die erforderliche mathematische Auswertung aller Meßergebnisse durchgeführt werden kann.

Durch einen Pfeil ist die erforderliche relative Drehbewegung R zwischen der interferometrischen Meßeinrichtung 2 und dem Prüfling 1 angedeutet, welche zwischen der Erfassung der einzelnen Meßergebnisse ausgeführt werden muß. Dabei ist für die schematische Darstellung die vermeintlich einfache Variante gewählt worden, bei welcher der Prüfling 1 gegenüber der interferometrischen Meßeinrichtung 2 gedreht wird. Selbstverständlich ist es jedoch auch denkbar, daß die interferometrische Meßeinrichtung 2 um den Prüfling 1 gedreht wird.

In Figur 2 ist die Lage von Meßpunkten am Beispiel von  $m = 3$  und  $n = 5$  Einzelmessungen zweier Meßreihen M, N dargestellt, welche für jede der Meßreihen M, N in äquidistanten Abständen bzw. Winkelstellungen über den gesamten Umfang des Prüflings 1 verteilt angeordnet sind.

Prinzipiell ist es dabei unwichtig, in welcher Reihenfolge die einzelnen Meßwerte  $M_1 \dots M_m$ ,  $N_1 \dots N_n$  erfaßt werden. Es ist für die Stabilität und damit die zu erzielende Meßsicherheit in dem Aufbau jedoch sinnvoll, wenn der Drehsinn der relativen Drehbewegung R zwischen der interferometrischen Meßeinrichtung 2 und dem Prüfling 1 während der gesamten Messung beibehalten wird.

Im dargestellten Ausführungsbeispiel könnte es daher sinnvoll sein, die Messungen in der Reihenfolge  $M_1, M_2, M_3, N_2, N_3, N_4, N_5$  durchzuführen. Auf die Messung  $N_1$  kann dabei verzichtet werden, da genau dieses Meßergebnis bereits aus der Messung  $M_1$  bekannt ist. Durch das Beibehalten der Drehrichtung und die innerhalb einer Meßreihe jeweils äquidistanten Drehwinkel kann somit eine sehr hohe Stabilität des Aufbaus in dem Verfahren erreicht

werden, welche eine gute Voraussetzung für qualitativ hochwertige Meßergebnisse darstellt. Bei dieser Vorgehensweise, bei der zuerst die m äquidistanten Abstände der einen Meßreihe M und dann die n bzw. (n-1) äquidistanten Abstände der anderen Meßreihe N angefahren werden, entsteht allerdings der Aufwand, daß der Prüfling 1 wenigstens zweimal vollständig relativ zu der interferometrischen Meßeinrichtung 2 gedreht werden muß. Wobei hier jedoch eine gute Reproduzierbarkeit aufgrund der jeweils äquidistant einzustellenden Winkelabstände erreicht werden kann.

Prinzipiell ist es jedoch auch denkbar, das Meßverfahren mit nur einer Umdrehung des Prüflings durchzuführen, wobei dann die einzelnen Meßstellungen gemäß dem Beispiel in Figur 2 in der Reihenfolge  $M_1, N_2, M_2, N_3, N_4, M_3, N_5$  angefahren werden. Da die einzelnen Meßpunkte jeder der Meßreihen M, N untereinander äquidistant sein müssen und nun Meßpunkte aus den beiden Meßreihen M, N gemischt ermittelt werden, ist hierbei die erforderliche mechanische Genauigkeit des Aufbaus zur Durchführung der relativen Drehbewegungen R etwas höher, da hier die nacheinander zu erfassenden Meßpunkte in einem nicht mehr äquidistanten Abstand zueinander liegen, welcher in der geforderten Genauigkeit und Reproduzierbarkeit schwieriger zu realisieren ist.

Nachfolgend soll anhand mathematischer Algorithmen die zu erzielende Meßgenauigkeit des beschriebenen Verfahrens sowie eine Beschreibung der Möglichkeiten zur Auswertung der erzielten Meßergebnisse aufgezeigt werden.

Grundlegend läßt sich bei jeder interferometrischen Prüfung des Prüflings 1 auf Wellenfrontfehler die gemessene Wellenfront

$$W = P + T$$

als eine Summe der Wellenfrontfehler des Prüflings

$$P = P_r + P_{nr}$$

und des Interferometers

$$T = T_r + T_{nr}$$

darstellen.

Dabei soll  $P_r$  bzw.  $T_r$  der rotationssymmetrische Anteil,  $P_{nr}$  bzw.  $T_{nr}$  der nicht-rotationssymmetrische Anteil der gemessenen Wellenfront sein. Für die Darstellung der Wellenfront in einer Summenschreibweise ergibt sich also

$$W = T_r + T_{nr} + P_r + P_{nr} \quad (1).$$

Werden nun in einer Messung gemäß dem Stand der Technik  $m$  Drehstellungen in einem azimuthalen Abstand von  $360^\circ/m$  gemessen und aufgemittelt, so fallen alle nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings 1 mit Ausnahme der Ordnungen  $k \cdot m \cdot \epsilon$  (mit  $k=1,2,3,\dots$ ) weg, womit sich

$$\langle W \rangle_m = T_r + T_{nr} + P_r + P_{nr}^{km\epsilon} \quad (2)$$

ergibt. Zur Bestimmung des Fehlers des Prüflings 1 kann man nun die Gleichung (2) von (1) subtrahieren und man erhält mit

$$W - \langle W \rangle_m = P_{nr} - P_{nr}^{km\epsilon} \quad (3)$$

alle nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings 1 bis auf die Ordnungen  $k \cdot m \cdot \epsilon$ . Legt man z.B. den Drehstellungstest mit  $m = 12$  Drehstellungen zugrunde, so bedeutet dies, daß man alle nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings 1 bis auf die Ordnungen 12, 24, 36, ... erhält. Das bedeutet, daß die Fehler im Bereich der 12-Welligkeiten, 24-Welligkeiten, 36-Welligkeiten usw. mit diesem Meßverfahren nicht erfasst werden können.

Führt man nun bei dem Verfahren analog zu der eingangs beschriebenen aus dem Stand der Technik bekannten Messung eine weitere Meßreihe mit  $n$  Drehstellungen aus, so ergibt sich analog zu dem oben Beschriebenen:

$$\langle W \rangle_n = T_r + T_{nr} + P_r + P_{nr}^{kn\epsilon} \quad (4)$$

und

$$W - \langle W \rangle_m = P_{nr} - P_{nr}^{kn\epsilon} \quad (5).$$

Subtrahiert man nun die Ergebnisse der Gleichungen (2) und (4) voneinander, erhält man die Fehlerbeiträge der Ordnungen  $k \cdot m \cdot \epsilon$  und  $k \cdot n \cdot \epsilon$  mit Ausnahme der Ordnungen  $k \cdot m \cdot n \cdot \epsilon$ , welche ja in beiden der Meßreihen  $M$ ,  $N$  enthalten sind, mit:

$$\langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n = P_{nr}^{km\epsilon} - P_{nr}^{kn\epsilon} \quad (6)$$

Voraussetzung hierzu ist selbstverständlich, daß  $m$  und  $n$  teilerfremde Zahlen sind.

Dreht man nun diese durch die Gleichung (6) beschriebene Wellenfront rechnerisch, beispielsweise mit der Hilfe eines entsprechenden Software-Programms,  $m$ -mal und mittelt die Ergebnisse auf, so fallen die  $k \cdot n \cdot \epsilon$ -Terme weg.

Addiert man das erzielte Ergebnis zur Gleichung (3), so erhält man mit

$$W_m = W - \langle W \rangle_m + \langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_m = P_{nr} - P_{nr}^{kmn\epsilon} \quad (7)$$

die nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings 1, mit Ausnahme der  $k \cdot m \cdot n \cdot \epsilon$ -Terme.

Analog dazu kann man natürlich auch das Ergebnis für  $n$ -Drehstellungen berechnen, um es zur weiteren Mittelung oder zur Analyse zu verwenden.

Dieses Verfahren bietet also die Möglichkeit, mit einer Anzahl von lediglich  $m + n$  Messungen, alle nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings 1, mit Ausnahme der Ordnungen  $k \cdot n \cdot m$ , absolut zu bestimmen. Daher ist eine Kombination aus  $5 + 7$  Messungen, was aufgrund der einen doppelt auftretenden Messung 11 Einzelmessungen entspricht, weitaus genauer als der Drehstellungstest mit beispielsweise 12 Meßpunkten.

Alternativ dazu lassen sich selbstverständlich auch mit weniger Einzelmessungen, beispielsweise  $3 + 4$  Messungen ähnliche Genauigkeiten erzielen, wie bei dem oben genannten 12-Stellungstest. Da hierfür jedoch lediglich 6 Meßpunkte, einer der theoretischen 7 Meßpunkte kommt doppelt vor, erforderlich sind, läßt sich die notwendige Meßzeit bzw. der notwendige Meßaufwand auf die Hälfte reduzieren.

Nachfolgend soll eine alternative Formulierung beschrieben werden, welche sich ergibt, wenn die Einzelmessungen gemäß der Gleichung (1) vor der Ermittlung rechnerisch auf eine gemeinsame Azimuthposition zurückgedreht werden. In diesem Fall heben sich die nicht-rotationssymmetrischen Interferometerfehler, mit Ausnahme der Ordnungen  $k \cdot m \cdot \epsilon$ , auf:

$$\langle W \rangle_m = T_r + T_{nr}^{km\epsilon} + P_r + P_{nr} \quad (8).$$

Bestimmt man nun rechnerisch das mittlere radiale Profil der Wellenfront

$$W_{RP} = T_r + P_r \quad (9)$$

und zieht es von der Wellenfront gemäß Gleichung (8) ab, so erhält man alle nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings 1 und zusätzlich auch die nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Interferometers 2 der Ordnungen  $k \cdot m \cdot \epsilon$  mit:

$$\langle W \rangle_m - W_{RP} = P_{nr} + T_{nr}^{km\epsilon} \quad (10).$$

Führt man dieselbe Prozedur analog mit n Drehstellungen aus, so ergibt sich

$$\langle W \rangle_n = T_r + P_r + P_{nr} + T_{nr}^{knè} \quad (11)$$

und

$$\langle W \rangle_n - W_{RP} = P_{nr} + T_{nr}^{knè} \quad (12).$$

Subtrahiert man nun die beiden Ergebnisse der Gleichungen (8) und (11) voneinander, erhält man die Fehlerbeiträge der Ordnungen  $k \cdot m \cdot è$  und  $k \cdot n \cdot è$  mit Ausnahme der Ordnungen  $k \cdot m \cdot n \cdot è$ , sofern m und n wieder teilerfremde Zahlen sind, da diese in beiden der Meßreihen M, N enthalten sind, zu

$$\langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n = T_{nr}^{kmè} - T_{nr}^{knè} \quad (13).$$

Dreht man nun die durch die Gleichung (13) beschriebene Wellenfront rechnerisch m-mal und mittelt auf, fallen wiederum die  $k \cdot n \cdot è$ -Terme weg. Man könnte sagen, man unterwirft den ermittelten Fehler erneut einem Drehstellungstest, allerdings auf einer rein mathematischen bzw. virtuellen Basis.

Durch Subtraktion des Ergebnisses von der Gleichung (10) erhält man mit

$$W_m = \langle W \rangle_m - W_{RP} - \langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_m = P_{nr} + T^{kmnè} \quad (14).$$

Die nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings, inklusive der  $k \cdot m \cdot n \cdot è$ -Terme des Interferometerfehlers. Auch hier kann analog dazu das Ergebnis für n Drehstellungen berechnet werden, um es zur weiteren Mittelung oder Analyse zu verwenden.

Selbstverständlich läßt sich der Fehler durch zusätzliche Drehstellungen weiter minimieren. So lassen sich beispielsweise mit drei Meßreihen M, N, O noch höhere Genauigkeiten erzielen. Mit einem 3+5+7-Stellungstest, also mit  $m = 3$ ,  $n = 5$  und  $o = 7$  Einzelmessungen lassen sich alle Fehler bis auf die Ordnungen

k·105 bestimmen. Da drei der Einzelmessungen doppelt vorkommen, reichen insgesamt 13 Meßpunkte aus um die entsprechende Genauigkeit zu erzielen. Auch hier ist wieder vorausgesetzt, daß es sich bei den Zahlen m, n, o um teilerfremde natürliche Zahlen handelt.

Kombiniert man nun n + m Messungen, wie oben angegeben, so erhält man analog zu der Gleichung (7) mit

$$W_M = W - \langle W \rangle_m + \langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_m = P_{nr} - P_{nr}^{kmne} \quad (15)$$

die nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings 1, mit Ausnahme der k·m·n·è-Terme. Ergänzend ergeben sich aus der Kombination der n + o Messungen

$$W_o = W - \langle W \rangle_o + \langle \langle W \rangle_o - \langle W \rangle_n \rangle_o = P_{nr} - P_{nr}^{knoè} \quad (16)$$

die nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings 1 mit Ausnahme der k·n·o·è-Terme. Subtrahiert man nun die beiden Gleichungen (15) und (16) voneinander, ergeben sich mit

$$W_o - W_M = P_{nr}^{kme} - P_{nr}^{knoè} \quad (17)$$

die Fehlerbeiträge der Ordnungen k·m·n·è und k·n·o·è mit Ausnahme der Ordnungen k·m·n·o·è, da diese ja in beiden Ergebnissen enthalten sind.

Dreht man nun auch diese durch die Gleichung (17) beschriebene Wellenfront rechnerisch m-mal und mittelt auf, so fallen die k·n·o·è-Terme weg. Durch Addition des Ergebnisses zur Gleichung (15) erhält man mit

$$W_{mn} = W - \langle W \rangle_m + \langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_m + \langle W_o - W_M \rangle = P_{nr} - P_{nr}^{kmnoè} \quad (18)$$

die nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Prüflings 1, mit Ausnahme der k·m·n·o·è-Terme analog zur Gleichung (7). Auch hier kann man natürlich die Ergebnisse für n Drehstellungen berechnen und diese zur weiteren Mittelung oder zur Analyse

verwenden wie dies oben bereits erwähnt wurde.

Algorithmen, welche bei drei Meßreihen den nicht-rotationssymmetrischen Interferometerfehler berücksichtigen, können auch hier wieder durch ein rechnerisches Drehen auf eine gemeinsame Azimuthposition analog zur Vorgehensweise bei zwei Meßreihen M, N erzielt werden. Entsprechende Algorithmen für Meßverfahren mit mehr als drei Meßreihen M, N, O, ... ergeben sich ebenfalls analog zu den bisher beschriebenen Möglichkeiten.

## Patentansprüche:

1. Verfahren zur interferometrischen Messung, insbesondere zur interferometrischen Absolutmessung, von nicht-rotationssymmetrischen Wellenfrontfehlern an einem Prüfling, welcher in mehrere Rotationsstellungen gebracht werden kann, wobei in jeder der Rotationsstellungen wenigstens ein Meßergebnis ermittelt wird, und wobei eine abschließende mathematische Auswertung aller Meßergebnisse erfolgt, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung in wenigstens zwei Meßreihen  $(M,N)$  durchgeführt wird, wobei die Meßergebnisse  $(M_1...M_m, N_1...N_n)$  jeder der Meßreihen  $(M,N)$  in jeweils zueinander äquidistanten Rotationsstellungen des Prüflings (1) ermittelt werden, wobei jede der Meßreihen  $(M,N)$  eine bestimmte Anzahl  $n, m$  an Messungen umfaßt, und wobei  $m$  und  $n$  natürliche und untereinander teilerfremde Zahlen sind.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in der ersten Meßreihe  $(M)$  die  $m$ -Meßergebnisse  $(M_1...M_m)$  in  $m$  äquidistanten Rotationsstellungen des Prüflings (1) ermittelt werden, wonach eine Verstellung des Prüflings (1) in eine dazu nicht äquidistante Rotationsstellung erfolgt, und wonach die wenigstens eine zweite Meßreihe  $(N)$  erfolgt, in welche die  $n$  Meßergebnisse  $(N_1...N_n)$  in den  $n$  äquidistanten Rotationsstellungen des Prüflings (1) ermittelt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die einzelnen Meßergebnisse  $(M_1...M_m, N_1...N_n)$  der wenigstens zwei Meßreihen  $(M,N)$  in ungeordneter Reihenfolge zueinander ermittelt werden.
4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßergebnisse  $(M_1...M_m, N_1...N_n)$  jeder der wenigstens zwei Meßreihen  $(M,N)$  unabhängig voneinander auf nicht-rotationssymmetrische Wellenfrontfehler  $(\langle W \rangle_m, \langle W \rangle_n)$  an dem Prüfling (1) ausgewertet werden, wobei eine Differenzbildung der wenigstens zwei nicht-rotationssymmetrischen Wellenfrontfehler  $(\langle W \rangle_m, \langle W \rangle_n)$  erfolgt, wonach die ge-

bildete Differenz ( $\langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n$ ) rechnerisch m oder n mal gedreht und die Ergebnisse aufgemittelt werden, und wonach mit dem so gemittelten Ergebnis ( $\langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_m$  oder  $\langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_n$ ) wenigstens einer der Wellenfrontfehler ( $\langle W \rangle_m, \langle W \rangle_n$ ) korrigiert wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Wellenfrontfehler ( $\langle W \rangle_m, \langle W \rangle_n$ ) mit dem gemittelten Ergebnis ( $\langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_m$  oder  $\langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_n$ ) durch Addition korrigiert wird.
6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Wellenfrontfehler ( $\langle W \rangle_m, \langle W \rangle_n$ ) mit dem gemittelten Ergebnis ( $\langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_m$  oder  $\langle \langle W \rangle_m - \langle W \rangle_n \rangle_n$ ) durch Subtraktion korrigiert wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Drehsinn der relativen Drehbewegung (R) während des Erfassens aller Meßergebnisse ( $M_1 \dots M_m, N_1 \dots N_n$ ) unverändert beibehalten wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß sich die äquidistanten Abstände der Meßergebnisse ( $M_1 \dots M_m, N_1 \dots N_n$ ) der einzelnen Meßreihen (M,N) jeweils aus den Quotienten aus einer vollen Umdrehung ( $360^\circ$ ) und der jeweiligen Anzahl m, n der Messungen jeder der Meßreihen (M,N) ermittelt.

Zusammenfassung:

Verfahren zur interferometrischen Messung von nicht-rotationssymmetrischen Wellenfrontfehlern

(Fig. 2)

Das Verfahren dient zur interferometrischen Messung, insbesondere zur interferometrischen Absolutmessung, von nicht-rotationssymmetrischen Wellenfrontfehlern an einem Prüfling (1). Der Prüfling kann dabei in mehrere Rotationsstellungen gebracht werden, wobei in jeder der Rotationsstellungen wenigstens ein Meßergebnis ermittelt wird. Abschließend erfolgt eine mathematische Auswertung aller Meßergebnisse. Die Messung wird in wenigstens zwei Meßreihen (M,N) durchgeführt. Die Meßergebnisse  $(M_1 \dots M_m; N_1 \dots N_n)$  jeder der Meßreihen (M,N) werden jeweils in zueinander äquidistanten Rotationsstellungen des Prüflings (1) ermittelt. Jede der Meßreihen (M,N) umfaßt eine bestimmte Anzahl m, n an Messungen. Die einzelnen Anzahlen m, n sind natürliche und untereinander teilerfremde Zahlen.

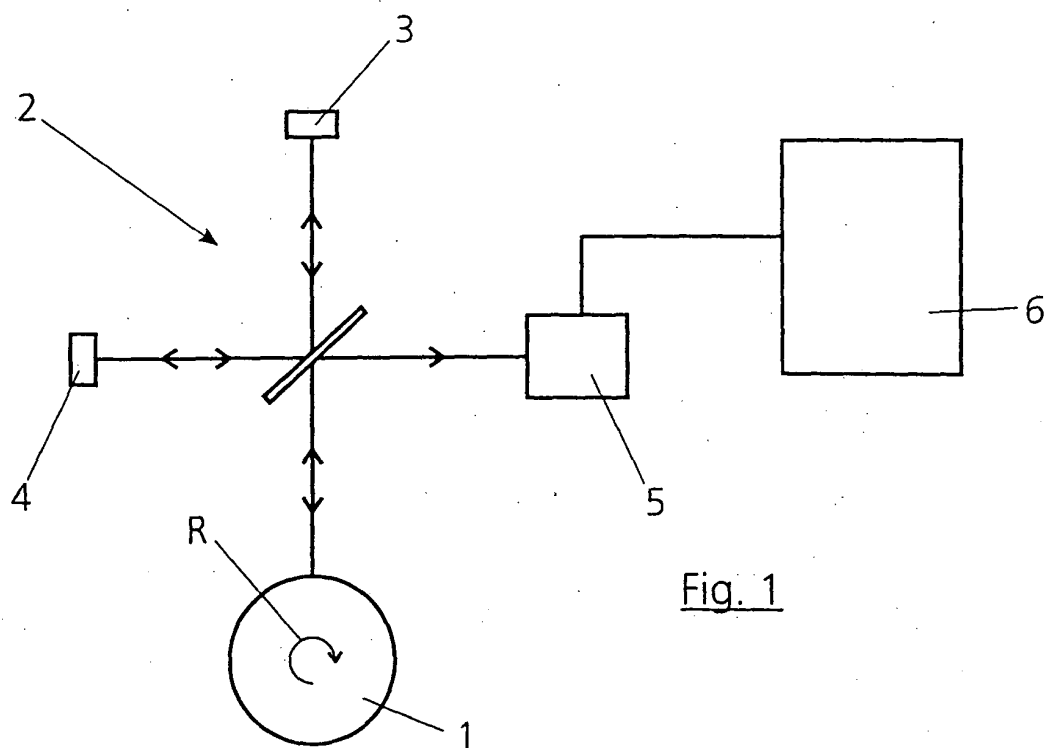


Fig. 1

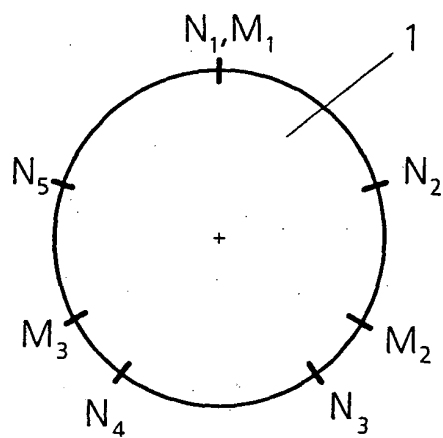


Fig. 2